

doi: 10.7690/bgzdh.2013.06.004

## 不确定环境下基于 PSO 算法的多无人机任务分配方法

陈侠, 胡永新

(沈阳航空航天大学自动化学院, 沈阳 110136)

**摘要:** 实战环境下, 无人机所获得的信息通常具有不确定性, 针对不确定环境下的多无人机任务分配问题, 提出了一种决策方法。分析无人机任务规划中各指标的不确定性, 采用主观赋值和客观赋值相结合的方法, 确定指标的综合权重, 将离散粒子群优化算法和区间数排序方法相结合, 给出区间形式不确定信息的无人机任务分配方法。仿真实验结果表明了该方法的可行性和有效性。该决策方法不仅能解决确定信息情况下的无人机任务分配问题, 而且能解决区间数不确定信息情况下的无人机任务分配问题。

**关键词:** UCAV; 任务规划; 粒子群优化算法; 区间数排序

**中图分类号:** TJ85 **文献标志码:** A

## Task Assignment of Multi-UCAV Based on PSO Algorithm Under Uncertain Environment

Chen Xia, Hu Yongxin

(School of Automation, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

**Abstract:** The information of UCAV obtained in combat environment typically has uncertainty. A decision-making method for multi-UAV task allocation problem under uncertain environment was presented. The uncertain indicators of UCAV task assignment are analyzed. Combine subjective and objective weights to determine indicators integrated weights. Combining particle swarm optimization (PSO) algorithm and ranking interval numbers method, the task assignment method based on interval-uncertain information was given. The simulation results proved the feasibility and effectiveness of the proposed method. The decision-making method can not only solve the UAV task allocation problem under the certain information environment, but also solve the UAV task allocation problem under the interval number uncertain information environment.

**Key words:** UCAV; task assignment; particle swarm optimization; ranking interval numbers

### 0 引言

随着无人机技术的逐渐成熟, 无人机在现代战场中发挥着越来越大的作用。日益复杂的战场环境使得对无人机任务规划系统的要求也越来越高。近年来, 无人机任务分配问题一直是无人机技术的重要研究课题<sup>[1-4]</sup>。文献[1]建立了多无人战斗机(unmanned combat aerial vehicle, UCAV)协同任务分配的多目标整数规划模型, 为解决复杂多约束UCAV协同任务分配问题提供了有效算法; 文献[2]考虑了软杀伤武器系统, 比如干扰和欺骗, 能够使目标威胁失效, 建立任务分配优化模型, 并采用粒子群优化算法求解; 文献[3]针对多无人机协同任务规划问题, 考虑了每个目标所需执行的任务类型, 引入启发式规则来确定各飞机执行其所要执行任务的先后顺序, 提出一种改进的遗传算法进行求解; 文献[4]建立了动态环境下基于市场的多无人机协同任务规划系统, 该系统将进化算法和市场理论相

结合实现任务分配和路径规划等。目前, 虽然国内外关于多UCAV任务规划的研究已取得了许多研究成果, 但许多技术尚处于研究探索阶段, 对复杂环境下基于区间信息的多UCAV任务规划的研究, 目前还没有文献报道。

在传统的分析过程和优化设计中, 通常采用确定的系统参数建立优化模型。但信息的不确定性广泛存在于测量偏差和武器性能指标等。通常不确定性信息有2种: 一种是偶然噪声引起的不确定性信息; 另一种是认知的不确定性信息<sup>[5]</sup>。前者信息是无法消除的, 而后者信息也很难完全消除; 因此, 为了能够获得可靠的分析结果, 需要考虑各种信息的不确定性。文献[6]研究了项目开发中的任务分配问题, 分析了影响任务分配的不确定因素, 并建立了不确定多因素下的多属性任务分配模型; 文献[7]提出一种基于变结构离散动态贝叶斯网络的任务决策模型, 运用变结构离散动态贝叶斯网络推理算法

收稿日期: 2012-12-25; 修回日期: 2013-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(61074159); 航空科学基金资助项目(2008ZG54023)

作者简介: 陈侠(1962—), 女, 辽宁人, 博士(后), 教授, 研究生导师, 从事系统工程、多无人机任务规划和航迹规划研究。

得到当前时刻的任务决策，实现了不确定环境下无人机自主动态任务决策；文献[8]针对作战中可能面临敌方不同预警机威胁的情景，以及威胁属性等级的不确定性，在决策过程中，考虑属性值为区间数形式信息，并采用逼近理想点排序法，给出了区间信息的多属性决策方法。

需要指出的是，在多UCAV的实战环境中，由于机载传感器的精度限制、战场的动态变化和各种干扰的影响，常常获得的是不确定的感知信息，并可在数学上表述为区间信息<sup>[9]</sup>；因此，笔者给出一种不确定环境下的无人机任务分配问题的决策方法，并通过仿真实验验证其可行性和有效性。

### 1 区间数的可能度概念及其性质

设  $\tilde{x}=[x^L, x^U]$  为区间数，其中  $x^L, x^U \in R$ ，并且

$$P_{\tilde{x} > \tilde{y}} = \begin{cases} 1 & x^L \geq y^U \text{ 且 } x^U > y^L \\ \frac{x^U - y^U}{x^U - x^L} + \frac{(y^U - x^L)(x^L - y^L) + 0.5(y^U - x^L)^2}{(x^U - x^L)(y^U - y^L)} & y^L < x^L < y^U \leq x^U \\ 0.5 & y^L = y^U = x^L = x^U \\ \frac{x^U - y^U + 0.5(y^U - y^L)}{x^U - x^L} & x^L \leq y^L \leq y^U \leq x^U \text{ 且 } x^U > x^L \end{cases}$$

相应地：

$$P_{\tilde{y} > \tilde{x}} = \begin{cases} 0 & x^L \geq y^U \text{ 且 } x^U > y^L \\ \frac{0.5(y^U - x^L)^2}{(x^U - x^L)(y^U - y^L)} & y^L < x^L < y^U \leq x^U \\ 0.5 & y^L = y^U = x^L = x^U \\ \frac{y^L - x^L + 0.5(y^U - y^L)}{x^U - x^L} & x^L \leq y^L \leq y^U \leq x^U \text{ 且 } x^U > x^L \end{cases} \quad (2)$$

**定理 1**  $P_{\tilde{x} > \tilde{y}}$  与  $P_{\tilde{y} > \tilde{x}}$  具有互补性，即

$$P_{\tilde{x} > \tilde{y}} + P_{\tilde{y} > \tilde{x}} = 1 \text{ (证明略)}。$$

**性质 1** 当  $y^L < x^L < y^U \leq x^U$  时，则  $P_{\tilde{x} > \tilde{y}} > 0.5$  (证明略)。

**性质 2** 对于 2 个区间数  $\tilde{x}$ ， $\tilde{y}$ ， $P_{\tilde{x} > \tilde{y}} \geq 0.5$  的充要条件为  $y^L - x^L \leq x^U - y^U$ 。

证明：

充分性：

若  $P_{\tilde{x} > \tilde{y}} \geq 0.5$ ，则存在以下 4 种情况：1)  $x^L \geq y^U$  且  $x^U > y^L$ ；2)  $y^L < x^L < y^U \leq x^U$ ；3)  $y^L = y^U = x^L = x^U$ ；4)  $x^L \leq y^L \leq y^U \leq x^U$  且  $x^U > x^L$ 。

在情况 1)和情况 2)中，显然  $x^U - y^U \geq 0$ ， $y^L - x^L < 0$ ，则  $y^L - x^L \leq x^U - y^U$  成立。

$x^L \leq x^U$ ，当  $x^L = x^U$  时  $\tilde{x}$  退化为一个实数。区间数  $\tilde{x}$  也可以表示为  $\langle m(\tilde{x}), w(\tilde{x}) \rangle$ ，其中  $m(\tilde{x}) = (x^L + x^U)/2$  为区间数  $\tilde{x}$  的中间值， $w(\tilde{x}) = (x^U - x^L)/2$  为区间数的半宽。对于 2 个区间数  $\tilde{x}$ ， $\tilde{y}$  有如下计算规则：

$$\begin{aligned} \tilde{x} + \tilde{y} &= [x^L + y^L, x^U + y^U] \\ \tilde{x} - \tilde{y} &= [x^L - y^U, x^U - y^L] \\ \tilde{x}\tilde{y} &= [\min(x^L y^L, x^L y^U, x^U y^L, x^U y^U), \\ &\quad \max(x^L y^L, x^L y^U, x^U y^L, x^U y^U)] \end{aligned}$$

特别地，当  $x^L \geq 0, y^L \geq 0, k \geq 0$  时，

$$\begin{aligned} \tilde{x}\tilde{y} &= [x^L y^L, x^U y^U] \\ k\tilde{x} &= [kx^L, kx^U] \end{aligned}$$

**定义** 对于 2 个区间数  $\tilde{x}$ ， $\tilde{y}$ ，令  $P_{\tilde{x} > \tilde{y}}$  为  $\tilde{x} > \tilde{y}$  的可能度，不失一般性，对  $\tilde{x}$ ， $\tilde{y}$ ，假设  $x^U \geq y^U$ ，则：

$$\begin{aligned} &x^L \geq y^U \text{ 且 } x^U > y^L \\ &y^L < x^L < y^U \leq x^U \\ &y^L = y^U = x^L = x^U \\ &x^L \leq y^L \leq y^U \leq x^U \text{ 且 } x^U > x^L \end{aligned} \quad (1)$$

在情况 3) 中， $y^L = y^U = x^L = x^U$ ，显然  $y^L - x^L = x^U - y^U = 0$ ，则  $y^L - x^L \leq x^U - y^U$  成立。

在情况 4) 中，若  $y^L - x^L > x^U - y^U$  成立，则  $x^U - 0.5y^U - 0.5y^L < 0.5(x^U - x^L)$ ，所以  $x^U - y^U + 0.5(y^U - y^L) < 0.5(x^U - x^L)$ ，两边同时除以  $(x^U - x^L)$ ，可得： $\frac{x^U - y^U + 0.5(y^U - y^L)}{x^U - x^L} < 0.5$  即  $P_{\tilde{x} > \tilde{y}} < 0.5$ ，这与已知条件矛盾，因此  $y^L - x^L \leq x^U - y^U$ 。

综上，若  $P_{\tilde{x} > \tilde{y}} \geq 0.5$ ，则  $y^L - x^L \leq x^U - y^U$ 。必要性(证明略)。

**定理 2** 设矩阵  $\mathbf{P} = (P_{ij})_{m \times m}$  为由定义确定的区间数  $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m$  的两两可能度矩阵<sup>[10]</sup>，其中  $P_{ij} = P_{\tilde{x}_i > \tilde{x}_j}$ ，若  $P_{ij} \geq 0.5$ ， $P_{jk} \geq 0.5$ ， $i, j, k \in \{1, 2, \dots, n\}$ ，则  $P_{ik} \geq 0.5$ 。

证明：

若  $P_{ij} \geq 0.5$ ， $P_{jk} \geq 0.5$ ， $i, j, k \in \{1, 2, \dots, n\}$ ，即： $P_{x_i > x_j} \geq 0.5$ ， $P_{x_j > x_k} \geq 0.5$ ， $i, j, k \in \{1, 2, \dots, n\}$ ；

由性质 2 可知： $x_i^U - x_j^U \geq x_j^L - x_i^L$ ， $x_j^U - x_k^U \geq x_k^L - x_j^L$ ，不等式两边相加，可得： $x_i^U - x_k^U \geq x_k^L - x_i^L$ ；由性质 2 可得： $P_{ik} \geq 0.5$ 。

证毕。

## 2 区间权重信息计算方法

### 1) 客观赋权<sup>[11]</sup>。

应用熵权法确定各个指标的权重。基本步骤为:

$$m(\tilde{y}_{ij}) = m(\tilde{x}_{ij}) / \sum_{i=1}^m m(\tilde{x}_{ij}) \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

$$w(\tilde{y}_{ij}) = [1 / (\sum_{l=1}^m m(\tilde{x}_{lj}))^2] \sqrt{(w(\tilde{x}_{ij}))^2 (\sum_{l=1, l \neq i}^m m(\tilde{x}_{lj}))^2 + (m(\tilde{x}_{ij}))^2 (\sum_{l=1, l \neq i}^m w(\tilde{x}_{lj}))^2)} \quad (3)$$

b. 若矩阵  $\tilde{X}$  的第  $j$  列为成本型指标, 则

$$m(\tilde{y}_{ij}) = \frac{1}{m(\tilde{x}_{ij})} / \sum_{i=1}^m \frac{1}{m(\tilde{x}_{ij})} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$$

$$w(\tilde{y}_{ij}) = \frac{1}{(\sum_{l=1}^m \frac{1}{m(\tilde{x}_{lj})})^2} \sqrt{\frac{(w(\tilde{x}_{ij}))^2}{m(\tilde{x}_{ij})^6} [1 - m(\tilde{x}_{ij}) \sum_{l=1}^m \frac{1}{m(\tilde{x}_{lj})}]^2 + (\frac{1}{m(\tilde{x}_{ij})})^2 (\sum_{l=1, l \neq i}^m \frac{w(\tilde{x}_{lj})^2}{m(\tilde{x}_{lj})^4})} \quad (4)$$

### ② 确定区间数熵权的中间值。

$$m(\tilde{w}_{obj}) = \frac{1 - m(\tilde{H}_j)}{n - \sum_{j=1}^n m(\tilde{H}_j)} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

其中,  $m(\tilde{H}_j) = -k \sum_{i=1}^m m(\tilde{y}_{ij}) \ln m(\tilde{y}_{ij})$ ,  $k = (\ln m)^{-1}$ 。

### ③ 确定区间权重半宽值。

计算熵值半宽值为

$$w(\tilde{H}_j) = k \sqrt{\sum_{i=1}^m [(\ln m(\tilde{y}_{ij}) + 1) w(\tilde{y}_{ij})]^2} \quad (6)$$

进一步, 可得到权重半宽值  $w(\tilde{x})$  为

$$w(\tilde{\omega}_{obj}) = [1 / (n - \sum_{l=1}^n m(\tilde{H}_l))] \sqrt{[w(\tilde{H}_j) (\sum_{l=1, l \neq j}^n m(\tilde{H}_l) - n + 1)]^2 + (1 - m(\tilde{H}_j))^2 \sum_{l=1, l \neq j}^n w(\tilde{H}_l)^2} \quad (7)$$

### ④ 确定客观区间权重。

$$\tilde{\omega}_{obj} = \langle m(\tilde{\omega}_{obj}), w(\tilde{\omega}_{obj}) \rangle \quad (8)$$

### 2) 主观赋权。

主客观权重反映的是决策者在主观方面对各项指标的偏好, 具有一定的主观随意性。专家根据自己的经验, 直接给出各指标的主观权重为

$$\tilde{\omega}_{sub} = \langle m(\tilde{\omega}_{sub}), w(\tilde{\omega}_{sub}) \rangle。$$

### 3) 综合赋权。

令  $\lambda$  偏好因子, 表示对客观赋权的偏好程度, 其中,  $0 \leq \lambda \leq 1$ 。

则指标综合权重表示为:

$$\tilde{\omega} = \lambda \times \tilde{\omega}_{obj} + (1 - \lambda) \times \tilde{\omega}_{sub} \quad (9)$$

### ① 规范化。

将决策矩阵  $\tilde{X} = [\tilde{x}_{ij}]_{m \times n}$  规范化为  $\tilde{Y} = [\tilde{y}_{ij}]_{m \times n}$ , 计算公式如下:

a. 若矩阵  $\tilde{X}$  的第  $j$  列为效益型指标, 则

## 3 多无人机任务分配模型的建立

无人机对地面目标实施攻击时, 许多指标对任务分配产生很重要的影响, 笔者考虑的指标主要有:  $S_1$  为无人机对目标毁伤能力, 是指无人机对目标实施攻击, 摧毁目标的能力;  $S_2$  为无人机攻击目标的性价比, 是指无人机对地面实施攻击时, 无人机收益与损失之间的比值;  $S_3$  为攻击目标所需时间, 是指无人机对目标实施攻击所必须的时间;  $S_4$  为目标对无人机威胁度, 是目标对我方无人机实施反击, 摧毁我方无人机的能力;  $S_5$  无人机与目标间距离。显然  $S_1$  和  $S_2$  为效益型指标,  $S_3$ 、 $S_4$  和  $S_5$  为成本型指标。对于每一个目标  $i$ , 其决策矩阵表示为:

$$\tilde{X}^i = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & S_3 \\ U_1 & \tilde{x}_{11}^i & \tilde{x}_{12}^i & \dots & \tilde{x}_{15}^i \\ U_2 & \tilde{x}_{21}^i & \tilde{x}_{22}^i & \dots & \tilde{x}_{25}^i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ U_m & \tilde{x}_{m1}^i & \tilde{x}_{m2}^i & \dots & \tilde{x}_{m5}^i \end{matrix}$$

其中  $U_j$  为第  $j$  架无人机,  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $\tilde{x}_{lp}^i$  为第  $l$  架无人机对应第  $p$  个指标的区间决策信息。

则总的决策矩阵为

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \tilde{X}^1 \\ \tilde{X}^2 \\ \vdots \\ \tilde{X}^m \end{bmatrix}$$

根据式 (3) 和式 (4), 可以得到规范化决策矩阵  $\tilde{Y} = [\tilde{y}_{ij}]_{m \times n}$ 。结合求得的综合权重  $\tilde{\omega}$ , 可以得到综合决策矩阵, 计算公式如下:

$$\tilde{Z} = \tilde{Y} \cdot \tilde{\omega}^T \quad (10)$$

则多无人机任务规划问题转化为单目标优化问题:

$$\begin{aligned} \tilde{J} &= \max \left( \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \cdot \tilde{Z}_{i+m*(j-1)} \right) \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} &= 1 \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} &\leq T_{\max} \end{aligned} \quad (11)$$

其中:  $x_{ij}$  表示无人机  $i$  是否执行任务  $j$ , 若执行, 则  $x_{ij} = 1$ ; 否则,  $x_{ij} = 0$ ;  $T_{\max}$  为单个无人机能同时攻击目标的个数。

#### 4 基于区间数排序的离散粒子群优化算法

粒子群算法于 1995 年由 Eberhart 博士和 Kennedy 博士提出, 由于该算法具有结构简单、寻优能力强等特点, 因而在许多优化领域得到了非常广泛的应用。在求解组合优化问题方面, 学者们通过自定义交叉变异操作, 给出了多种离散粒子群优化算法<sup>[12]</sup>。

区间信息多无人机任务分配问题的特点是方案目标函数值均为区间数形式; 因此, 为了对方案进行优劣排序, 将区间目标函数值两两进行比较, 得到区间数的可能度矩阵, 并采用已有的基于互补判断矩阵的排序方法, 对各个方案进行排序, 进而得到方案集的最优方案。

采用合适的编码方式是用粒子群算法求解问题的关键。通常每个粒子都对应问题的一个可行解。笔者采用整数编码方式, 粒子结构为一个  $n$  维向量,  $n$  为任务数, 向量的每一个元素为无人机的编号, 其中第  $i$  个元素代表执行第  $i$  个任务的无人机编号。例如 4 架无人机 5 个任务的一个粒子为: 2 4 1 3 4, 表示第 1 个任务由第 2 架无人机执行, 第 2 个任务由第 4 架无人机执行, 第 3 个任务由第 1 架无人机执行, 第 4 个任务由第 3 架无人机执行, 第 5 个任务由第 4 架无人机执行。

每个个体最优粒子为相应个体曾经到达的最好位置, 其更新方式描述如下: 设上一代个体最优粒

子为  $P^i(t)$ , 当前个体最优粒子为  $P^i(t+1)$ , 新产生的粒子为  $X^i(t+1)$ , 如果  $P_{\tilde{f}(X^i(t+1)) > \tilde{f}(P^i(t+1))} > 0.5$ , 则  $P^i(t+1) = X^i(t+1)$ , 其中  $\tilde{f}(x)$  表示适应度函数, 如果  $P_{\tilde{f}(X^i(t+1)) > \tilde{f}(P^i(t+1))} \leq 0.5$ , 则  $P^i(t+1) = P^i(t)$ 。

全局最优粒子为当前所有粒子达到的最好位置。通过对当前种群个体最优粒子的区间适应度两两进行比较, 得到可能度矩阵。再根据互补的可能度矩阵排序方法, 对区间适应度进行排序, 则将排名第一的粒子作为全局最优粒子。

变异操作对于保证粒子种群的多样化起很重要的作用, 笔者采用的变异操作方法为: 随机对粒子的 2 个不同位置上的元素进行互换。

交叉操作包括与个体最优粒子进行交叉和全局最优粒子进行交叉 2 部分。与个体最优粒子进行的交叉操作为: 在个体最优粒子中随机选择一个交叉区域, 用该区域的元素替换当前粒子的对应区域的元素。与全局最优粒子进行的交叉操作为: 在全局最优粒子中随机选择一个交叉区域, 用该区域的元素替换当前粒子对应区域的元素。

算法步骤如下:

- 1) 确定惯性权重, 学习因子, 种群规模  $N$ , 最大迭代次数, 并随机产生  $N$  个粒子;
- 2) 以当前粒子为个体最优, 求出每个粒子对应的适应度, 根据区间数排序方法求出全局最优;
- 3) 以一定概率对当前粒子进行交叉操作和变异操作, 得到新一代粒子;
- 4) 求出每个粒子对应的适应度, 对当前每个粒子和其对应的个体最优粒子进行排序, 得到新的个体最优, 将所有的个体最优进行排序得到新的全局最优;
- 5) 重复步骤 3)和步骤 4), 直达到最大迭代次数, 循环结束后, 输出全局最优粒子, 算法结束。

#### 5 算例

已知有 6 架无人机和 10 个任务, 单个无人机最多能同时攻击 2 个目标, 每个目标仅分配给 1 架无人机, 战场信息如表 1~表 10 所示。

表 1 针对目标 1 的各方案属性指标值

编号	无人机对目标毁伤能力	无人机攻击目标攻击性价比	攻击目标所需时间/s	目标对无人机威胁度	无人机与目标间距离/km
UCAV 1	[0.81,0.86]	[0.86,0.90]	[11,16]	[0.28,0.32]	[70,77]
UCAV 2	[0.83,0.86]	[0.81,0.87]	[14,19]	[0.35,0.39]	[66,73]
UCAV 3	[0.85,0.88]	[0.88,0.92]	[20,24]	[0.31,0.36]	[74,81]
UCAV 4	[0.89,0.93]	[0.82,0.88]	[19,24]	[0.30,0.35]	[62,70]
UCAV 5	[0.81,0.84]	[0.85,0.90]	[17,22]	[0.29,0.33]	[66,74]
UCAV 6	[0.81,0.85]	[0.80,0.86]	[18,22]	[0.33,0.38]	[67,74]

表 2 针对目标 2 的各方案属性指标值

编号	无人机对目标毁伤能力	无人机攻击目标攻击性价比	攻击目标所需时间/s	目标对无人机威胁度	无人机与目标间距离/km
UCAV 1	[0.84,0.88]	[0.86,0.91]	[16,21]	[0.35,0.40]	[62,70]
UCAV 2	[0.84,0.89]	[0.87,0.92]	[14,18]	[0.27,0.32]	[66,74]
UCAV 3	[0.86,0.90]	[0.89,0.93]	[20,24]	[0.28,0.33]	[74,82]
UCAV 4	[0.88,0.92]	[0.86,0.90]	[19,24]	[0.30,0.34]	[74,82]
UCAV 5	[0.89,0.92]	[0.79,0.85]	[21,25]	[0.29,0.33]	[72,80]
UCAV 6	[0.81,0.84]	[0.82,0.87]	[20,25]	[0.26,0.31]	[65,72]

表 3 针对目标 3 的各方案属性指标值

编号	无人机对目标毁伤能力	无人机攻击目标攻击性价比	攻击目标所需时间/s	目标对无人机威胁度	无人机与目标间距离/km
UCAV 1	[0.80,0.84]	[0.80,0.86]	[14,19]	[0.32,0.37]	[72,80]
UCAV 2	[0.89,0.94]	[0.82,0.86]	[18,22]	[0.27,0.31]	[70,78]
UCAV 3	[0.91,0.96]	[0.89,0.94]	[14,18]	[0.33,0.38]	[61,69]
UCAV 4	[0.95,0.99]	[0.82,0.87]	[15,20]	[0.33,0.38]	[62,70]
UCAV 5	[0.84,0.89]	[0.90,0.95]	[17,21]	[0.34,0.39]	[74,81]
UCAV 6	[0.93,0.97]	[0.84,0.90]	[19,23]	[0.26,0.30]	[74,82]

表 4 针对目标 4 的各方案属性指标值

编号	无人机对目标毁伤能力	无人机攻击目标攻击性价比	攻击目标所需时间/s	目标对无人机威胁度	无人机与目标间距离/km
UCAV 1	[0.84,0.88]	[0.85,0.90]	[21,26]	[0.24,0.29]	[75,82]
UCAV 2	[0.91,0.94]	[0.82,0.87]	[19,24]	[0.33,0.37]	[64,72]
UCAV 3	[0.92,0.97]	[0.80,0.85]	[18,23]	[0.31,0.36]	[70,78]
UCAV 4	[0.88,0.91]	[0.88,0.92]	[21,26]	[0.33,0.38]	[74,81]
UCAV 5	[0.83,0.88]	[0.89,0.93]	[18,23]	[0.25,0.29]	[63,70]
UCAV 6	[0.85,0.88]	[0.83,0.88]	[21,25]	[0.33,0.37]	[69,77]

表 5 针对目标 5 的各方案属性指标值

编号	无人机对目标毁伤能力	无人机攻击目标攻击性价比	攻击目标所需时间/s	目标对无人机威胁度	无人机与目标间距离/km
UCAV 1	[0.89,0.92]	[0.86,0.91]	[15,19]	[0.33,0.37]	[64,71]
UCAV 2	[0.86,0.89]	[0.83,0.87]	[14,18]	[0.33,0.38]	[74,82]
UCAV 3	[0.84,0.88]	[0.84,0.88]	[13,17]	[0.35,0.40]	[72,79]
UCAV 4	[0.84,0.89]	[0.84,0.88]	[15,19]	[0.26,0.31]	[65,72]
UCAV 5	[0.92,0.96]	[0.85,0.90]	[17,21]	[0.26,0.30]	[67,75]
UCAV 6	[0.84,0.87]	[0.84,0.89]	[20,24]	[0.29,0.33]	[64,71]

表 6 针对目标 6 的各方案属性指标值

编号	无人机对目标毁伤能力	无人机攻击目标攻击性价比	攻击目标所需时间/s	目标对无人机威胁度	无人机与目标间距离/km
UCAV 1	[0.82,0.85]	[0.84,0.88]	[21,26]	[0.27,0.31]	[74,81]
UCAV 2	[0.81,0.84]	[0.86,0.92]	[17,22]	[0.28,0.32]	[75,82]
UCAV 3	[0.92,0.95]	[0.80,0.85]	[17,22]	[0.32,0.37]	[67,74]
UCAV 4	[0.90,0.95]	[0.80,0.86]	[14,19]	[0.31,0.35]	[61,68]
UCAV 5	[0.94,0.99]	[0.81,0.85]	[18,22]	[0.33,0.37]	[67,74]
UCAV 6	[0.86,0.89]	[0.89,0.95]	[12,17]	[0.29,0.34]	[63,70]

表 7 针对目标 7 的各方案属性指标值

编号	无人机对目标毁伤能力	无人机攻击目标攻击性价比	攻击目标所需时间/s	目标对无人机威胁度	无人机与目标间距离/km
UCAV 1	[0.95,0.99]	[0.87,0.91]	[12,17]	[0.26,0.31]	[65,73]
UCAV 2	[0.87,0.92]	[0.83,0.88]	[16,20]	[0.26,0.31]	[72,79]
UCAV 3	[0.91,0.94]	[0.82,0.88]	[13,17]	[0.32,0.36]	[67,74]
UCAV 4	[0.94,0.98]	[0.84,0.90]	[13,17]	[0.27,0.32]	[69,77]
UCAV 5	[0.89,0.92]	[0.89,0.93]	[18,22]	[0.31,0.35]	[64,72]
UCAV 6	[0.89,0.92]	[0.88,0.93]	[12,16]	[0.31,0.36]	[69,76]

表 8 针对目标 8 的各方案属性指标值

编号	无人机对目标毁伤能力	无人机攻击目标攻击性价比	攻击目标所需时间/s	目标对无人机威胁度	无人机与目标间距离/km
UCAV 1	[0.85,0.88]	[0.80,0.84]	[18,23]	[0.34,0.38]	[72,80]
UCAV 2	[0.94,0.98]	[0.85,0.90]	[13,18]	[0.35,0.39]	[73,81]
UCAV 3	[0.89,0.92]	[0.88,0.93]	[16,21]	[0.32,0.36]	[68,75]
UCAV 4	[0.80,0.84]	[0.84,0.90]	[21,25]	[0.34,0.38]	[66,74]
UCAV 5	[0.84,0.89]	[0.87,0.91]	[16,20]	[0.30,0.34]	[70,77]
UCAV 6	[0.88,0.91]	[0.90,0.95]	[18,22]	[0.34,0.39]	[61,68]

表 9 针对目标 9 的各方案属性指标值

编号	无人机对目标毁伤能力	无人机攻击目标攻击性价比	攻击目标所需时间/s	目标对无人机威胁度	无人机与目标间距离/km
UCAV 1	[0.94,0.99]	[0.89,0.93]	[19,24]	[0.32,0.37]	[68,75]
UCAV 2	[0.82,0.86]	[0.84,0.88]	[16,21]	[0.26,0.31]	[75,82]
UCAV 3	[0.86,0.89]	[0.88,0.94]	[17,22]	[0.34,0.39]	[62,69]
UCAV 4	[0.90,0.93]	[0.87,0.93]	[15,20]	[0.33,0.37]	[70,78]
UCAV 5	[0.93,0.97]	[0.85,0.90]	[20,24]	[0.26,0.30]	[65,72]
UCAV 6	[0.81,0.84]	[0.80,0.86]	[12,16]	[0.31,0.36]	[61,68]

表 10 针对目标 10 的各方案属性指标值

编号	无人机对目标毁伤能力	无人机攻击目标攻击性价比	攻击目标所需时间/s	目标对无人机威胁度	无人机与目标间距离/km
UCAV 1	[0.80,0.84]	[0.90,0.95]	[13,17]	[0.29,0.33]	[71,79]
UCAV 2	[0.94,0.99]	[0.89,0.94]	[14,19]	[0.28,0.32]	[75,82]
UCAV 3	[0.88,0.91]	[0.84,0.89]	[13,17]	[0.29,0.33]	[69,76]
UCAV 4	[0.94,0.99]	[0.80,0.84]	[17,21]	[0.28,0.33]	[74,82]
UCAV 5	[0.89,0.94]	[0.85,0.89]	[13,17]	[0.28,0.32]	[73,80]
UCAV 6	[0.92,0.95]	[0.86,0.90]	[18,22]	[0.30,0.35]	[69,77]

根据式 (5)、式 (7)，确定客观权重为：  
 ([0.002,0.004] [0.025,0.026] [0.470,0.479]  
 [0.319,0.324] [0.173,0.177])。已知主观权重为[0.35  
 0.25 0.1 0.2 0.1]，不妨设定客观权重的偏好为 0.6，  
 则综合权重为：([0.177,0.178] [0.118,0.119]  
 [0.396,0.398] [0.211,0.213] [0.094 6,0.095 8])，参数  
 设置如下：种群规模 50，最大迭代次数 200，惯性  
 权重为 0.5，学习因子为 0.6 和 0.7，最终搜索到的  
 最优解为 1 2 3 5 4 6 1 2 6 5，适应度区间值为[0.164 1,  
 0.197 9]。对应的分配方案为第 1 架无人机执行第 1  
 个任务，第 2 架无人机执行第 2 个任务，第 3 架无  
 人机执行第 3 个任务，第 5 架无人机执行第 4 个任  
 务，第 4 架无人机执行第 5 个任务，第 6 架无人机  
 执行第 6 个任务，第 1 架无人机执行第 7 个任务，  
 第 2 架无人机执行第 8 个任务，第 6 架无人机执行  
 第 9 个任务，第 5 架无人机执行第 10 个任务。

从给出的数据来看，每一个属性指标值均为区  
 间数，最终得到的每一个方案效益值均为区间数，  
 并且区间数之间难免有交叉，这给判断各个方案的  
 优劣带来了一定的困难。目前较为常用的方法是通  
 过两两比较区间数可能度，构成可能度矩阵，对区  
 间数的方案进行排序。但随着问题规模的扩大，仅  
 使用区间数排序的方法将很难快速完成任务的目标  
 分配。而笔者将区间数排序和粒子群算法结合起来，  
 从图 1 看来，适应度区间值随着迭代次数的增加  
 逐渐变好，起到了寻优的目的。由于该算法继承  
 了粒子群优化算法寻优能力强的特点，因此在较少  
 的迭代次数内收敛到最优。

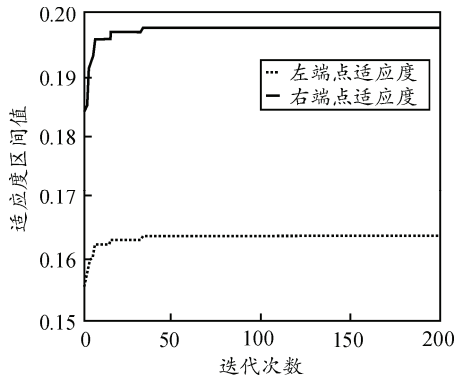


图 1 适应度区间值变化曲线

## 6 结论

不确定环境下的无人机任务分配问题的决策方  
 法不仅能够解决确定信息情况下的无人机任务分配  
 问题，而且可以解决区间数不确定信息情况下的无  
 人机任务分配问题，该方法简单且易于实现。仿真  
 结果表明，该方法用于不确定环境下无人机任务分  
 配问题是有效的、可行的。

## 参考文献：

- [1] 叶媛媛. 多 UCAV 协同任务规划方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.
- [2] Jose B. Cruz, Jr. Particle Swarm Optimization for Resource Allocation in UAV Cooperative Control[C]. //Proceedings of the ALAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Reston, VA, USA: 2004: 2549-2559.
- [3] 陈成, 邢立宁, 谭跃进. 求解多机协同任务规划的改进遗传算法[J]. 兵工自动化, 2010, 29(9): 28-31.
- [4] Anawat Pongpunwattana, Rolf Rysdyk. Real-Time Planning for Multiple Autonomous Vehicles in Dynamic Uncertain Environments[J]. AIAA Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, 2004, (S1542-9423), 2004, 1(12): 580-604.
- [5] 张勇. 区间多目标优化问题的微粒群优化理论及应用 [D]. 中国矿业大学, 2009.
- [6] 张利, 陈士明, 张建军. 不确定多因素下的多属性决策在任务分配中的应用[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2008, 31(6): 851-853.
- [7] 任佳, 高晓光, 等. 复杂环境下的无人机任务决策模型 [J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(1): 100-103.
- [8] 万路军, 姚佩阳, 王冬旭, 等. 预警机威胁度的区间型不确定多属性决策方法[J]. 电光与控制, 2011, 18(2): 22-25.
- [9] 蒋峥, 刘斌. 不确定优化问题的研究动向[J]. 武汉科技大学学报: 自然科学版, 2006, 29(6): 599-602.
- [10] 张全, 樊治平, 潘德惠. 不确定性多属性决策中区间数的一种排序方法[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(5): 129-133.
- [11] 尤天慧, 樊治平. 不确定性多属性决策中确定熵权的一种误差分析方法[J]. 系统工程, 2003, 21(1): 101-104.
- [12] 高尚, 韩斌, 吴小俊, 等. 求解旅行商问题的混合粒子群优化算法[J]. 控制与决策, 2004, 19(11): 1286-1289.